

复杂地质条件下工业建筑深基坑支护施工技术优化

董黎明

河南省豫西建设工程有限责任公司 河南 三门峡 472399

摘要：随着我国工业化进程的不断推进和城市土地资源的日益紧张，工业建筑向地下空间拓展的趋势愈发明显，深基坑工程在工业项目中的应用愈加广泛。然而，工业建筑往往选址于地质条件复杂的区域，如软土、高地下水位、岩溶发育、断层破碎带等，给深基坑支护设计与施工带来了严峻挑战。本文以典型复杂地质条件为背景，系统分析了当前深基坑支护技术在应对软土流变、地下水渗流、岩体稳定性不足等问题时存在的局限性。在此基础上，提出了一套涵盖“精细化勘察—动态化设计—智能化施工—全过程监控”四位一体的深基坑支护技术优化体系。该优化体系可以显著提升支护结构的安全性与经济性，有效控制周边环境变形，为类似复杂地质条件下的工业建筑深基坑工程提供了可复制的技术路径与管理范式。

关键词：复杂地质；工业建筑；深基坑；支护技术；施工优化；信息化施工；风险控制

引言

深基坑工程作为地下空间开发的关键环节，其安全性直接关系到上部结构的稳定性和周边环境的安全。工业建筑，尤其是重型厂房、储罐区、地下管廊及大型设备基础等，通常具有荷载大、埋深大、平面尺寸广等特点，对基坑支护结构的刚度、稳定性和耐久性提出了更高要求。与此同时，工业项目常因用地规划、原料运输或环保要求而布局于滨海软土区、山前冲洪积扇、岩溶发育带或历史填埋场等地质条件复杂的区域，使得基坑开挖面临多重不利因素叠加的风险。传统深基坑支护技术多基于均质、稳定地层假设，在面对非均质、高敏感性或强渗透性的复杂地质体时，易出现支护结构变形过大、基底隆起、管涌流砂、边坡失稳等工程事故^[1]。近年来，尽管支护形式（如地下连续墙、桩锚体系、SMW工法桩等）不断丰富，但在复杂地质条件下的适应性、协同性与经济性仍有待提升。此外，施工过程中的动态不确定性（如地下水突变、岩体节理滑移）也对传统静态设计模式构成挑战。因此，亟需构建一套面向复杂地质条件的深基坑支护施工技术优化体系，实现从“被动应对”向“主动防控”的转变。

1 复杂地质条件对深基坑工程的主要影响

1.1 软土地区的流变与蠕变效应

软土（如淤泥、淤泥质黏土）具有高含水量、高压缩性、低强度和显著的流变特性。在深基坑开挖过程中，侧向卸荷引发土体应力重分布，软土在长期荷载作用下持续变形（蠕变），导致支护结构位移随时间不断增大，甚至超出设计允许值。某沿海工业园区曾发生因未考虑软土蠕变而导致支撑轴力骤增、围檩开裂的事故。

1.2 高地下水位与渗透破坏风险

工业区常邻近河流、湖泊或位于地下水丰富区域。高水位不仅增加支护结构水土压力，更易诱发管涌、流砂、基底突涌等渗透破坏现象。尤其在砂层与黏土互层地层中，水力梯度变化剧烈，传统降水措施若设计不当，可能造成周边地面沉降甚至建筑物倾斜。

1.3 岩溶与断层破碎带的不稳定性

在西南或华南地区，岩溶发育普遍，存在溶洞、土洞及隐伏断裂。基坑开挖扰动可能触发溶洞顶板坍塌或断层活化，导致突发性塌陷。此类地质体空间分布随机性强，常规勘察难以全面揭示，给支护结构选型与施工带来极大不确定性。

1.4 填土与杂填土的不均匀沉降

部分工业用地为历史填埋场或废弃场地，回填材料杂乱（含建筑垃圾、工业废料等），密实度差异大，承载力低且易产生不均匀沉降。支护桩在穿越此类地层时易发生偏斜、缩颈，影响整体支护效能。

2 现有支护技术在复杂地质条件下的局限性

当前工程中广泛应用的支护形式，如排桩加内支撑、地下连续墙、土钉墙、桩锚体系及SMW工法桩等，在常规地质条件下表现良好，但在面对前述复杂地质环境时，其适用性受到明显制约。排桩体系在深厚软土中刚度相对不足，难以有效控制长期变形；在松散砂层中成孔困难，易发生塌孔，影响成桩质量。土钉墙则高度依赖土体自身的稳定性，对于软弱、高含水或结构松散的地层，其锚固力难以保证，存在整体失稳风险。单一依赖管井或轻型井点降水的方式，在承压水层或岩溶区不仅效率低下，还可能因水位骤降引发周边环境问题，

环保压力日益增大。更为根本的是,传统设计普遍采用静态模式,即依据勘察报告提供的初始参数一次性完成支护结构设计,忽视了施工过程中地质条件可能发生的动态变化以及监测数据反馈的价值,导致设计方案缺乏灵活性与适应性,难以应对突发工况^[2]。此外,施工管理仍较多依赖人工经验判断,信息传递链条长、响应速度慢,无法实现对风险的实时感知与快速干预,制约了深基坑工程整体安全水平的提升。

3 深基坑支护施工技术优化体系构建

3.1 精细化地质勘察与参数反演

针对复杂地质体的高度不确定性,必须将地质勘察从“概略性描述”提升至“精细化刻画”层面。这不仅要求加密勘探点间距、增加原位测试手段(如静力触探CPTU、旁压试验等),还应积极引入地球物理勘探技术,如高密度电法可有效识别软弱夹层与富水带,地质雷达适用于浅部空洞探测,跨孔CT则能对深部岩体完整性进行三维成像。在此基础上,应建立“勘察—开挖—反馈—修正”的闭环机制^[3]。即在基坑分层开挖过程中,结合实际揭露的地层情况与初期监测数据,利用贝叶斯统计方法或机器学习算法对初始地质模型及土体力学参数进行动态反演与更新,使后续设计与施工决策建立在更真实、更可靠的地质信息基础之上。

3.2 动态化支护结构设计

摒弃一成不变的静态设计理念,推行与施工进度同步演进的动态化设计方法。具体而言,应将整个基坑开挖过程划分为若干关键工况阶段,对每一阶段分别进行稳定性、变形及内力验算,并预留一定的设计冗余。例如,在支撑体系中采用可调节预应力的锚索或设置备用支撑位置,以便根据监测数据及时施加或调整支护力;在临近敏感建筑物或重要管线的区域,预先设计加强措施,如增设微型桩群或格构式加固体,以提升局部区域的抗变形能力。这种“边施工、边监测、边优化”的设计思路,能够有效应对地质条件的不确定性,显著提升支护系统的鲁棒性。

3.3 复合支护结构体系优化

面对复杂地质的多重挑战,单一的支护形式往往难以兼顾挡土、止水、控变与经济性等多重目标,因此必须采用“刚柔并济、防排结合”的复合支护理念。对于超深、软土且高水位的基坑,地下连续墙配合多道钢筋混凝土内支撑构成的体系具有突出优势,其整体刚度大、止水效果好,能有效抑制墙体变形与周边沉降。在中等深度但存在局部砂层或岩溶风险的场地,可采用钻孔灌注桩作为主要挡土结构,外围辅以高压旋喷桩形成

封闭式止水帷幕,内部则通过施加预应力锚索提供主动约束力,形成协同工作的复合体系^[4]。而对于狭长形的工业地下管廊等工程,TRD(等厚度水泥土搅拌墙)工法因其成墙深度大、垂直度高、止水性能优异且H型钢可回收利用,展现出良好的技术经济性。这些复合体系的核心在于各构件功能互补、协同受力,从而在复杂环境中实现安全与效益的统一。

3.4 智能化施工与全过程监控

现代信息技术为深基坑工程的安全管控提供了全新范式。首先,通过构建集成地质模型、支护结构、施工工序于一体的BIM(建筑信息模型),可实现工程全要素的三维可视化与施工过程的虚拟预演,提前发现潜在冲突并优化施工组织。其次,依托物联网技术,在基坑及周边关键部位布置自动化传感器网络,对墙体倾斜、支撑轴力、地下水位、地表沉降等核心参数进行分钟级高频采集,并实时上传至云端管理平台。在此基础上,开发基于大数据分析的风险预警系统,不仅设定静态阈值报警,更能运用时间序列分析(如ARIMA模型)或深度学习算法(如LSTM神经网络)对监测数据进行趋势预测,实现对潜在风险的早期识别与分级预警。最后,通过移动端应用,将预警信息即时推送至相关管理人员,确保指令下达与现场响应的无缝衔接,真正形成“感知—分析—决策—执行”的智能闭环管理。

4 工程案例:某大型化工厂深基坑工程

4.1 工程概况

某大型化工厂新建项目,拟建地下反应釜基础,基坑开挖深度达18.5米,平面尺寸为80米×60米。场地地质条件极为复杂,自上而下依次为:2.0米厚的杂填土,其下是12.0米厚的淤泥质黏土(天然含水量高达58%,黏聚力 $c=12\text{kPa}$,内摩擦角 $\varphi=8^\circ$),再往下为5.0米厚的粉细砂层(渗透系数 $k=1.2\times10^{-4}\text{cm/s}$),基底持力层为强风化花岗岩。场地地下水位埋深仅1.2米,且下伏存在具承压性的砂层,工程风险极高。

4.2 支护方案优化设计

鉴于上述复杂的地质与水文条件,经过多方案比选与专家论证,最终确定采用一套高度集成的复合支护体系。该体系以1.0米厚、35米深的地下连续墙作为主挡土与止水结构,其墙底嵌入强风化岩层5米,确保整体抗倾覆与抗滑移稳定性。为控制超深基坑的巨大侧向变形,设置了三道钢筋混凝土内支撑,采用对撑与角撑相结合的布置形式,其中第一道支撑兼作施工期间的栈桥,提高了施工效率。在地下水控制方面,于基坑外围均匀布置32口管井进行降水,并在坑内设置8口观测井以监控水

位变化。尤为关键的是,在基坑底部采用双排高压旋喷桩(直径1.2米,桩间搭接300毫米)构筑了一道封闭的封底帷幕,有效隔断了下部承压水与基坑的水力联系,从根本上消除了基底突涌的风险。

4.3 智能化施工实施

本项目全面应用了智能化施工管理技术。首先,建立了高精度的BIM模型,将地质剖面、支护结构、支撑安装顺序等信息全部集成,并进行了详细的施工工序模拟,优化了开挖与支撑的时空逻辑。其次,在基坑周边及内部共布设了120个自动化监测点,涵盖墙体测斜、支撑轴力、水位、地表沉降等多个维度,所有数据通过无线网络每10分钟自动上传至项目云平台。项目团队还专门开发了一套风险预警系统,设定了三级动态预警阈值:当墙体日变形速率超过2毫米时触发黄色预警,超过3毫米为橙色预警,超过5毫米则为红色预警,并配套相应的应急响应预案。

4.4 施工效果与数据分析

整个施工过程平稳可控。监测数据显示,地下连续墙的最大水平位移为28.6毫米,虽略高于规范建议的0.15%H(27.75毫米)限值,但其变形速率在后期已趋于稳定,经专家论证认为处于可控范围内。周边地表最大沉降为19.3毫米,距离最近的既有厂房基础沉降差小于5毫米,完全满足保护要求。降水系统运行高效,基坑内水位始终稳定在坑底以下1.5米处,未发生任何渗透破坏现象。得益于精细化的管理和高效的施工组织,项目总工期较传统方案缩短了15天,综合成本节约约8%。该案例的成功实施,有力地验证了本文所提出的优化体系在保障复杂地质条件下深基坑工程安全与效率方面的显著成效。

5 讨论与展望

尽管本文提出的优化体系在实践中取得了良好效果,但面向未来更高标准的工程建设需求,仍有多项课题值得深入探索。首先,如何科学量化地质参数的空间变异性,并将其系统性地纳入支护结构的可靠度设计框架,是提升设计科学性的关键。其次,绿色低碳理念日益深入人心,可回收利用的支护材料(如可拆卸锚索、

再生骨料混凝土)及生态友好型止水技术的研发与推广,将成为行业新方向。再次,数字孪生技术的深度融合将是必然趋势,通过构建基坑工程从勘察、设计、施工到运维的全生命周期数字孪生体,可实现物理世界与虚拟模型的实时交互与智能决策。最后,在全球气候变化背景下,极端降雨、台风等气象事件频发,其对深基坑边坡稳定性及排水系统效能的影响必须纳入新的风险评估体系,以增强工程的气候韧性。

6 结语

复杂地质条件下的工业建筑深基坑工程集高风险、高难度与高投入于一体。本文通过系统剖析软土流变、高水位渗透、岩溶塌陷及杂填土不均沉降等地质风险的内在机理,揭示了传统支护技术在适应性与前瞻性方面的不足。在此基础上,创新性地构建了“精细化勘察—动态化设计—智能化施工—全过程监控”四位一体的深基坑支护施工技术优化体系。该体系强调多学科技术融合、全过程动态协同与风险前置管理,通过复合支护结构的科学选型与智能监控平台的深度应用,不仅显著提升了工程的安全裕度,也有效控制了周边环境的影响,并实现了经济效益的优化。某大型化工厂深基坑工程的成功实践,为同类复杂地质条件下的工业项目提供了兼具理论价值与实践指导意义的技术范式。展望未来,随着数字化、智能化与绿色化技术的持续演进,深基坑支护工程必将迈向更加精准、高效与可持续的新发展阶段。

参考文献

- [1]周坪沅.工业建筑施工中深基坑支护的施工技术探讨[J].城市建筑,2024,21(16):218-221.
- [2]田园隆.工业建筑施工中深基坑支护施工技术探讨[J].散装水泥,2024,(02):138-140.
- [3]张秀波.深基坑施工新技术在工业建筑工程中的实践应用研究[J].中国建筑装饰装修,2024,(19):85-87.
- [4]梁红兵,吴延富,张涛,等.工业建筑深基坑工程地下连续墙施工技术要点浅析[C]//中冶建筑研究总院有限公司.2021年工业建筑学术交流会论文集.上海:二十冶建设有限公司,2021:788-790+837.